

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
для виконання розрахунково-графічної роботи  
з навчальної дисципліни

**«ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ»**

*(для студентів усіх форм навчання і слухачів другої вищої освіти  
за напрямом 6.050702 – Електромеханіка спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(фахове спрямування «Електричні системи і комплекси транспортних  
засобів», «Електричний транспорт», «Електромеханічні системи  
автоматизації та електропривод»))*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2017**

Методичні вказівки для виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Основи теорії електромагнітної сумісності» (для студентів усіх форм навчання і слухачів другої вищої освіти за напрямом 6.050702 – Електромеханіка спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (фахове спрямування «Електричні системи і комплекси транспортних засобів», «Електричний транспорт», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. К. Я. Івакіна. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 24 с.

Укладач канд. техн. наук, ст. викл. К. Я. Івакіна

Рецензент

В. Г. Ягуп, професор кафедри системи електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 3  
від 18.10.2016 р.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЗАВДАННЯ ТА ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ.....	5
2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	8
2.1 Електромагнітні процеси в перетворювальній установці тягової підстанції.....	8
2.2 Дослідження впливу вихідної напруги випрямляча тягової підстанції на контактну мережу.....	14
2.3 Дослідження фільтруючого обладнання тягової підстанції постійного струму.....	17
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	23
ДОДАТОК А Варіанти завдань для розрахунково-графічної роботи.....	24

## Вступ

В відповідності з визначенням Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) під електромагнітною сумісністю розуміється здатність електротехнічного обладнання задовільно функціювати в електромагнітному середовищі, не створюючи недопустимого впливу на друге обладнання та зовнішнє середовище.

Електричний транспорт в своєму складі має електричні системи які характеризуються несиметрією і передачею електричної енергії з несинусоїдним змінним та пульсуючим постійним струмами.

Перетворення на тягових підстанціях або рухомому складі електричної енергії змінного струму в енергію постійного струму і навпаки пов'язано зі значними величинами реактивної енергії. Крім того, дискретний характер перетворення електричної енергії і наявність нелінійних елементів в напівпровідникових перетворювачах викликає споживання із мережі несинусоїдного струму, що призводить до спотворення форм живильної напруги електросистеми.

Електрична тяга змінного струму є потужним однофазним навантаженням, що викликає несиметрію в живлячій трифазній мережі. Наявність несиметрії трифазної мережі є причиною появи в випрямленій напрузі додаткових гармонічних складових, що підвищують вплив на суміжні системи.

Для розв'язання задачі пошуку шляхів поліпшення електромагнітної сумісності систем тягового електропостачання з суміжними системами необхідно чітко уявляти електромагнітні процеси, що протікають в цих системах. Чітке уявлення сутності процесів, що протікають в системах тягового електропостачання є умовою поліпшення їх електромагнітної сумісності. Даний підхід покладено в основу розрахунково-графічної роботи.

## **1 ЗАВДАННЯ ТА ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ**

*Темою розрахунково-графічної роботи є розрахунок електромагнітної сумісності тягової підстанції постійного струму з живильною та контактною мережами.*

*Мета роботи – здобуття навичок по розрахунку та аналізу гармонічного складу вихідної напруги та вхідного струму випрямної установки тягової підстанції постійного струму.*

При виконанні розрахунково-графічної роботи необхідно дотримуватися таких положень:

1. Пояснювальна записка до розрахунково-графічної роботи пишеться чорнилами або може бути набрана за допомогою комп'ютера на стандартних аркушах розміром 210×297; на обкладинці пояснювальної записки необхідно зазначити дисципліну, назву роботи, прізвище, ініціали і шифр групи студента.

2. Пояснювальна записка повинна бути написана охайно, зрозумілим почерком, без скорочення слів або набрана на комп'ютері (шрифт 14 Times New Roman, полуторний інтервал).

3. Розрахунки потрібно супроводжувати поясненнями. Розрахункові формули приводяться спочатку у загальному вигляді з застосуванням прийнятих літерних позначень, після чого слід підставити у формулу числові величини, а потім проставити результат.

Необхідно навести пояснення величин, що входять у формулу, обов'язково проставляючи для отриманих величин їх розмірності. При виборі необхідних розрахункових величин і параметрів, використанні таблиць, формул, довідкових матеріалів необхідно робити посилання на джерела; використану літературу (автор, назва книги, рік видання) слід

навести в кінці пояснювальної записки. Матеріал слід наводити з дотриманням прийнятої в технічній літературі термінології.

4. Рисунки виконуються з використанням креслярського інструменту і відповідно до прийнятих ДСТУ.

5. Сторінки пояснювальної записки, ілюстрації, таблиці і графіки повинні бути пронумеровані. Таблиці повинні мати назву, ілюстрації та графіки – підписуночі підписи.

### ЗАВДАННЯ

1. Намалювати схему випрямляча з пульсністю  $m = 6$  і з'єднанням обмоток трансформатора — «зірка» / «зірка».

3. Виконати розрахунок перших п'ятнадцять ( $k = 1...15$ ) гармонік струму вторинної обмотки випрямляча пульсності  $m=6$ . Результати розрахунків занести в таблицю 1.1.

4. Намалювати схему випрямляча з пульсністю  $m = 6$  і з'єднанням обмоток трансформатора — «зірка» / «трикутник».

Таблиця 1.1 – Результати розрахунків

$K$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$I_{k\infty}$ $m=6$															
$I_{k\infty}$ $m=12$															

5. Намалювати схему випрямляча з пульсністю  $m = 12$ .

6. Виконати розрахунок перших п'ятнадцять ( $k = 1...15$ ) гармонік струму для випрямляча пульсності  $m = 12$ . Результати розрахунків занести в таблицю 1.1.

7. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.

8. Виконати розрахунок коефіцієнта потужності для шестипульсного та дванадцятипульсного випрямлячів. При розрахунках підставити  $\varphi_{(1)} = 0$ .

9. Визначити  $U_{do}$  при з'єднанні вторинних обмоток силового трансформатора «зіркою» та «трикутником».

10. Виконати розрахунок амплітуд перших п'ятнадцяти гармонік пульсації вихідної напруги випрямляча ( $q = 1 \dots 15$ ) для  $m = 6$  та  $m = 12$ . Результати розрахунків занести в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунків

$q$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_q$ $m=6$															
$U_q$ $m=12$															

11. Виконати розрахунок коефіцієнта пульсації для  $m = 6$  та  $m = 12$ .

12. Побудувати графік  $U(q) = f(q)$ .

13. Виконати розрахунок перших восьми ( $v = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22$ ) неканонічних гармонік. Результати занести в таблицю 1.3.

Таблицю 1.3 – Результати розрахунків

$v$	2	4	8	10	14	16	20	22
$U_v$								

13. Накреслити електричні схеми сгладжувального  $LC$  – фільтра та комбінованого фільтра.

14. З використанням даних таблиці 2.1 розрахувати амплітудно-частотну характеристику  $LC$  – фільтра та комбінованого фільтра.

15. Побудувати графіки логарифмічних амплітудно-частотних характеристик обох фільтрів ( $LC$  – фільтра та комбінованого фільтра).

16. Зробити висновок яка із досліджених схем випрямлячів має кращу електромагнітну сумісність із живильною мережею.

## 2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ

### 2.1 Електромагнітні процеси в перетворювальній установці тягової підстанції

На тягових підстанціях постійного струму залізниць та метрополітенів застосовуються некеровані напівпровідникові 6 та 12-пульсові випрямлячі.

Електрична схема 6-пульсного трифазного випрямляча наведена на рисунку 2.1.

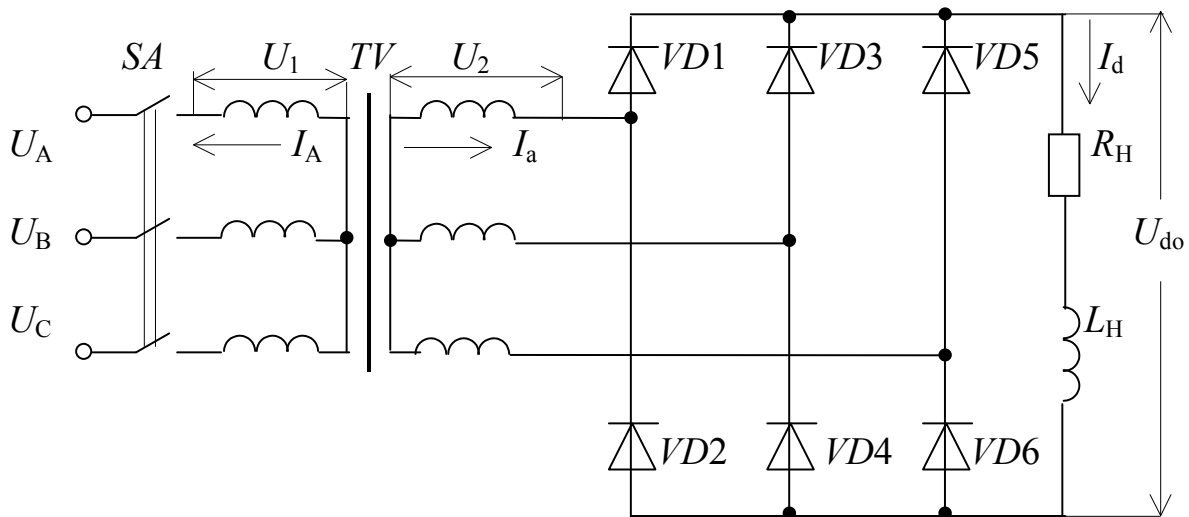


Рисунок 2.1 – Схема 6-пульсного трифазного випрямляча

На вході трифазного мостового випрямляча діє система фазних напруг  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ , яка зв'язана із системою фазних напруг  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  коефіцієнтом трансформації

$$K_T = \frac{w_2}{w_1} = \frac{U_2}{U_1}, \quad (2.1)$$

- де  $w_1$  – кількість витків первинної обмотки трансформатора;  
 $w_2$  – кількість витків вторинної обмотки трансформатора;  
 $U_1$  – напруга первинної обмотки трансформатора;  
 $U_2$  – напруги вторинної обмотки трансформатора.



На рисунку 2.2 наведені часові діаграми, що характеризують зміни напруги і струмів випрямляча.

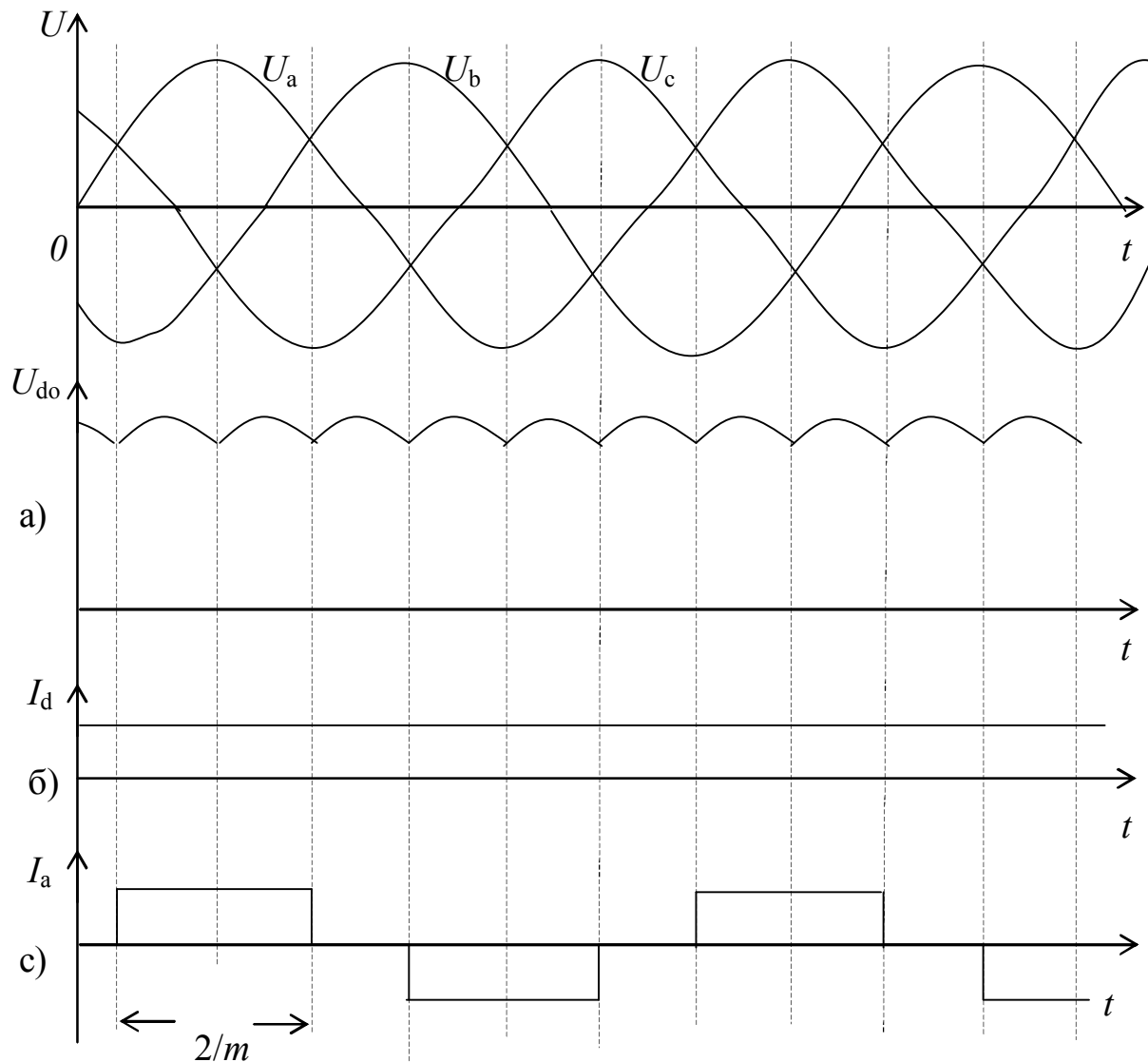


Рисунок 2.2 – Діаграми струму та напруг випрямляча

В режимі безперервного струму  $I_d$  в колі навантаження середнє значення випрямленої напруги визначається за формулою [1, 2, 3]

$$U_{do} = \sqrt{6} \cdot U_2 \cdot \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}, \quad (2.2)$$

де  $U_2$  – ефективне значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора;

$m = 6$  – пульсність випрямляча.

Коли  $L_H = \infty$ , випрямлений струм не має в своєму складі змінної складової (рис. 2.2, б). Струм  $I_d$  є ідеально сглаженим. Фазний струм  $I_{a\infty}$  має форму рівно полярних прямокутних імпульсів, які наведені на рисунку 2.2, в. В цьому випадку амплітуда  $k$ -ї гармоніки фазного струму визначається рівнянням

$$I_{k\infty} = \frac{2I_d}{\pi k} [1 - (-1)^k] \sin k \frac{2\pi}{m}, \quad (2.3)$$

де  $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

Як слідує із (2.3) при  $L_H = \infty$  в фазному струмі відсутні гармоніки кратні трьом.

Всі гармоніки струму вторинної обмотки трансформуються в первинну обмотку

$$I_{kA} = -I_k \cdot K_T. \quad (2.4)$$

При дослідженні впливу випрямляча на живлячу мережу оцінюють величину коефіцієнта потужності.

Під коефіцієнтом потужності прийнято розуміти відношення активної потужності до повної, що споживається із живлячої мережі

$$\lambda = \frac{P}{S}. \quad (2.5)$$

Коли система живильних напруг симетрична і синусоїдальна, і з неї споживається синусоїдальний струм, то коефіцієнт потужності визначається як

$$\lambda = \cos \varphi, \quad (2.6)$$

де  $\varphi_{(1)}$  — кут зсуву кривої струму відносно кривої напруги.

При  $\cos \varphi = 1$  активна потужність дорівнює повній потужності, що означає ефективне застосування пристрою.

Як впливає із рисунка 2.2, випрямляч тягової підстанції споживає із живильної мережі несинусоїдний струм. Коли система живлячих напруг симетрична і синусоїдальна, а випрямляч споживає симетричний несинусоїдальний струм, то його коефіцієнт потужності [1,3]

$$\lambda = \frac{U_A \cdot I_{A(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)}}{U_{(1)} \cdot I_A} = K_\phi \cdot \cos \varphi_{(1)}, \quad (2.7)$$

де  $I_{A(1)}$  – ефективне значення основної ( $k = 1$ ) гармоніки струму;  
 $\cos \varphi_{(1)}$  – коефіцієнт зсуву між кривими основної гармоніки струму і напруги;

$$I_A = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{A(k)}^2} \text{ – ефективне значення струму;}$$

$$K_\phi = \frac{I_{A(1)}}{I_A} \text{ – коефіцієнт спотворення форми кривої струму.}$$

Електрична схема 12-пульсового паралельного випрямляча наведена на рисунку 2.3.

Даний випрямляч складається із двох трифазних мостових схем. Вторинна обмотка першого випрямляча з'єднана за схемою «зірка», а другого – за схемою «трикутник». Так як обмотки  $L1.1$  і  $L1.2$  реактора магнітна між собою зв'язані, то середнє значення випрямленої напруги випрямляча визначається наступним чином

$$U'_{do} = \frac{U_{dY} + U_{d\Delta}}{2}, \quad (2.8)$$

де  $U_{doY}$  – середнє значення вихідної напруги верхнього моста;  
 $U_{do\Delta}$  – середнє значення вихідної напруги нижнього моста.

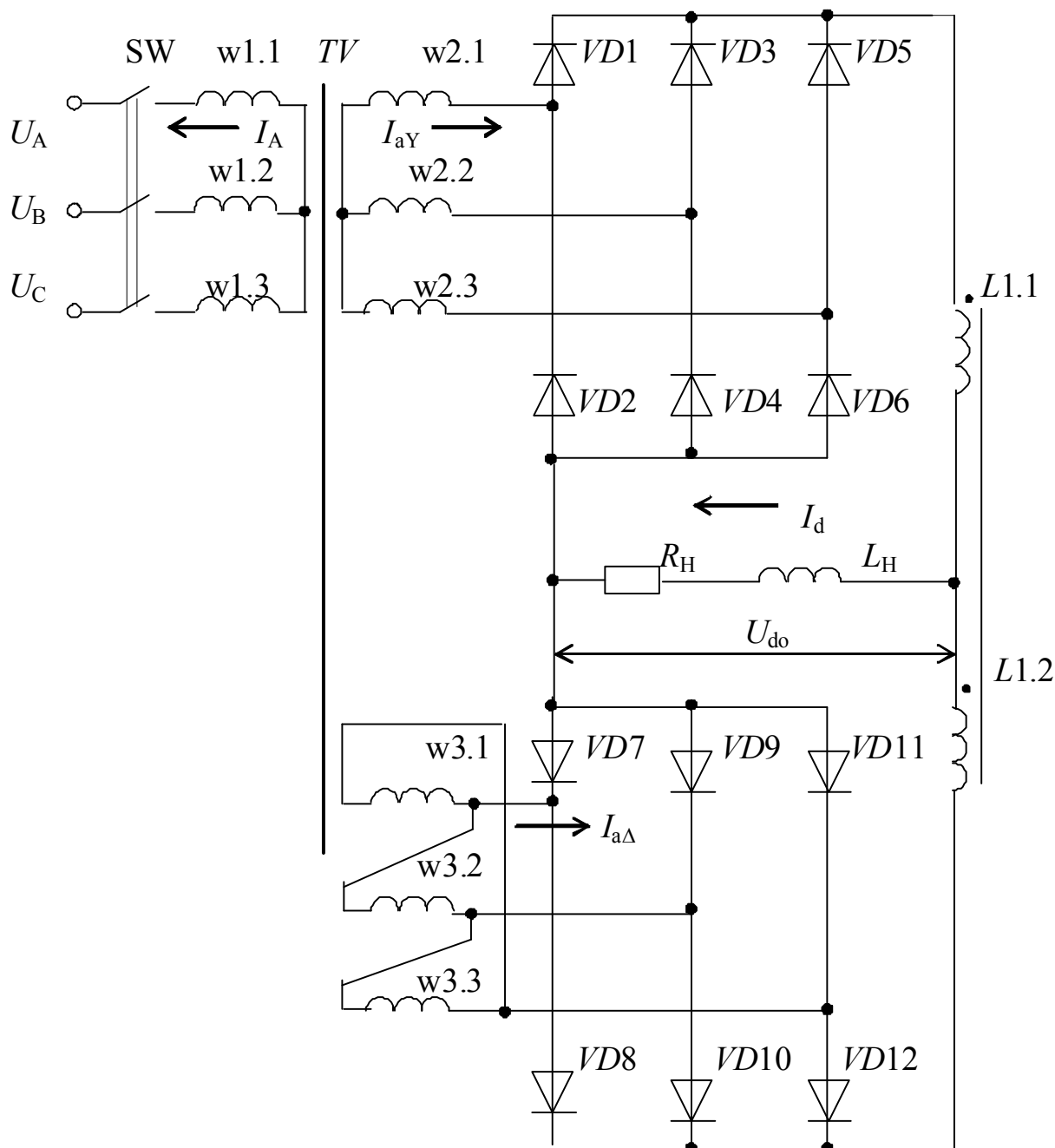


Рисунок 2.3 – Схема 12-пульсового паралельного випрямляча

На рисунку 2.4 наведені часові діаграми, що характеризують форми струмів і напруг в 12-пульсовій схемі випрямляча при  $L \rightarrow \infty$ .

Амплітуда  $k$ -ї гармоніки фазного струму випрямляча пульсності  $m = 6$  при з'єднанні обмоток «трикутником» визначається за формулою

$$I_{k\infty\Delta} = \frac{2\sqrt{3 \cdot I_d}}{k \cdot \pi} [1 - (-1)^k] \cdot \sin k \frac{\pi}{6}. \quad (2.9)$$

Амплітуда  $k$  – ї гармоніки споживаємого із живильної мережі струму випрямляча пульсності  $m = 12$  визначається сумою рівнянь (2.3) та (2.9)

$$I_{k\infty A} = \frac{2 \cdot I_d}{\pi \cdot k} [1 - (-1)^k] \sin k \frac{\pi}{3} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \cos k \frac{\pi}{6}\right). \quad (2.10)$$

Із (2.10) випливає, що в 12-пульсовій схемі відбувається компенсація гармонік кратних номерам

$$k = 6 \cdot n \pm 1, \quad (2.11)$$

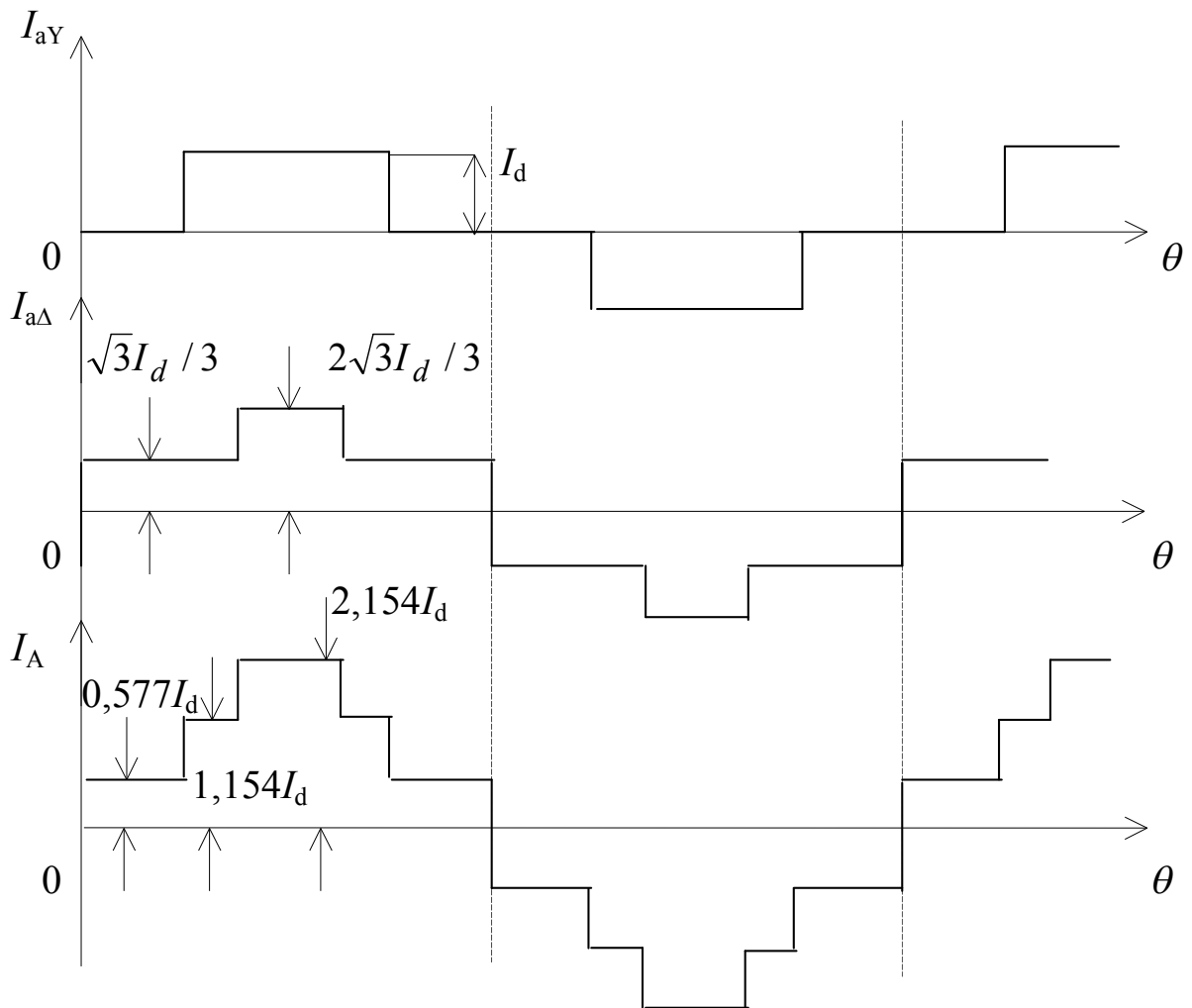


Рисунок 2.4 – Часові діаграми

## 2.2 Дослідження впливу вихідної напруги випрямляча тягової підстанції на контактну мережу

В результаті перетворення змінної напруги живлячої мережі на виході випрямляча тягової підстанції діє напруга середнє значення якої визначається наступним чином:

вторинна обмотка силового трансформатора з'єднана «зіркою» [3]

$$U_{do} = U_2 \frac{m \cdot \sqrt{6}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}, \quad (2.12)$$

вторинна обмотка силового трансформатора з'єднана «трикутником»

$$U_{do} = U_2 \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}, \quad (2.13)$$

де  $U_2$  – ефективне значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора,

$m$  – пульсність випрямляча.

Внаслідок дискретного характеру перетворення напруги живлячої мережі вихідна напруга випрямляча в своєму складі має пульсації. Симетричний випрямляч, що живиться від симетричної системи Е.Р.С. генерує в навантаження канонічні гармоніки. Частоти цих гармонік зв'язані з частотою Е.Р.С. живлячої мережі і визначаються як

$$f_q = f_o \cdot m \cdot q, \quad (2.14)$$

де  $f_o = 50\text{Гц}$  – частота живлячих Е.Р.С.,  $q = 1, 2, 3, \dots$  – порядковий номер канонічної гармоніки.

Амплітуда  $q$  – гармоніки пульсацій випрямляча тягової підстанції [3]

$$U_{(q)m} = U_{do} \frac{2}{q^2 \cdot m^2 - 1} \quad (2.15)$$

Із формули (2.14) випливає, що частота основної гармоніки для вихідної напруги визначаються пульсністю перетворювача. Амплітуди гармонік зменшуються з зростанням їх порядкових номерів, про що свідчить формула (2.15).

Коефіцієнт пульсації для  $q$  — гармоніки дорівнює [3]

$$K_n = \frac{U_{qm}}{U_{do}} = \frac{2}{q^2 \cdot m^2 - 1}. \quad (2.16)$$

При живленні випрямляча тягової підстанції постійного струму від несиметричної мережі з коефіцієнтом несиметрії [2]

$$\varepsilon = \frac{U_2}{U_1} e^{j\psi}, \quad (2.18)$$

де  $U_1$  – напруга прямої послідовності несиметричних Е.Р.С.,

$U_2$  – напруга зворотної послідовності,

$\Psi = U_2 \wedge U_1$  - кут, що характеризує зсув напруги зворотної послідовності відносно прямої, в вихідну напругу генеруються додаткові гармоніки (неканонічні) [4].

Частоти цих гармонік кратні подвоєній частоті напруги живильної мережі

$$f_v = 2 \cdot v \cdot f_o, \quad (2.19)$$

де  $v = 1, 2, 3, \dots$  – номер неканонічної гармоніки.

Амплітуда  $\nu$ -ї неканонічної гармоніки

$$U_{\nu} = U_{do} \frac{\varepsilon}{\nu - 1}, \quad (2.20)$$

для  $\nu=2(1+3k)$ ;

$$U_{\nu} = U_{do} \frac{\varepsilon}{\nu + 1}, \quad (2.21)$$

для  $\nu=2(2+3k)$ , де  $k=0,1,2,3,\dots$ .

Згідно з ГОСТ 13109-97 «Норми качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» коефіцієнт несиметрії в не повинен перевищувати 2%.

В трифазній мережі модуль і фазу напруги зворотної послідовності можна визначати по показникам вольтметрів, що включені на лінійні напруги [5]

$$U_2 = \frac{1}{3} \sqrt{(\Delta U_{BC} - \Delta U_{CA})^2 + \Delta U_{BC} \Delta U_{CA}}, \quad (2.22)$$

$$\Psi = \frac{\pi}{6} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3}(\Delta U_{CA} - \Delta U_{BC})}{\Delta U_{BC} + \Delta U_{CA}}, \quad (2.23)$$

де  $\Delta U_{BC} = U_{BC} - U_{AB}$ ;  $\Delta U_{CA} = U_{CA} - U_{AB}$ .

Із (2.19) випливає, що несиметрія Е.Р.С. живлячої мережі викликає генерацію в вихідну напругу випрямляча неканонічні гармоніки частоти яких значно нижчі від частоти основної гармоніки. Як видно із (2.20), (2.21) амплітуди цих гармонік на відміну від канонічних гармонік не залежить від пульсності випрямляча.



## 2.3 Дослідження фільтруючого обладнання тягової підстанції постійного струму

Зменшені величини пульсацій у контактній мережі, що викликані наявністю у вихідній напрузі випрямляча змінної складової. Досягається за допомогою згладжуючих фільтрів.

При проектуванні та електрифікації ділянок залізниць нормативними документами вимагається встановлення на виході випрямляча тягової підстанції згладжуючого фільтра електрична схема якого наведена на рисунку 2.5.

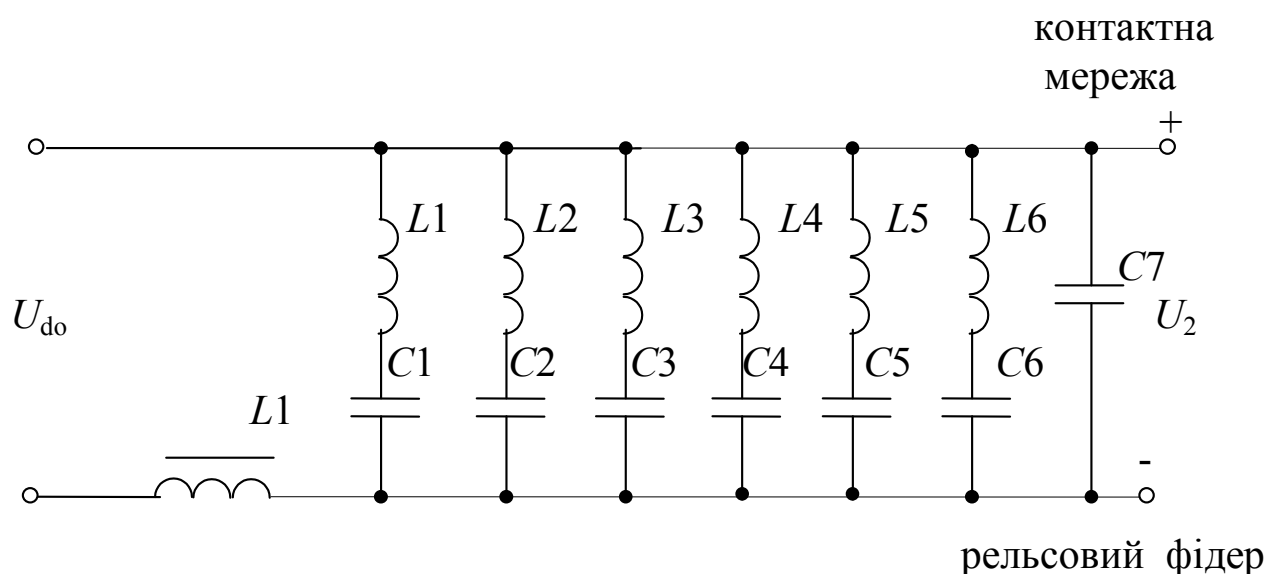


Рисунок 2.5 – Електрична схема згладжуючого фільтра

Наведена схема складається із Г-образного  $LC$  – згладжуючого фільтра, що побудований на  $L1$ ,  $C7$ .

Цей фільтр є основним в поліпшенні якості електричної енергії в контактній мережі. На елементах  $C1...C6$ ,  $L2...L7$  побудовані режекторні фільтри, що додатково зменшують амплітуди гармонік з частотами 100 Гц, 200 Гц, 400 Гц., 500 Гц та 600 Гц.

Рекомендовані параметри елементів згладжуючого фільтра наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри елементів згладжуючого фільтра

$L1$ [Гн $\times 10^{-3}$ ]	$L2$ [Гн $\times 10^{-3}$ ]	$L3$ [Гн $\times 10^{-3}$ ]	$L4$ [Гн $\times 10^{-3}$ ]	$L5$ [Гн $\times 10^{-3}$ ]	$L6$ [Гн $\times 10^{-3}$ ]	$L7$ [Гн $\times 10^{-3}$ ]
10	17,59	5,85	2,93	2,64	2,11	1,95
$C7$ [мкФ]	$C1$ [мкФ]	$C2$ [мкФ]	$C3$ [мкФ]	$C4$ [мкФ]	$C5$ [мкФ]	$C6$ [мкФ]
204	144	108	96	60	48	36
$f1$ [Гц]	$f2$ [Гц]	$f3$ [Гц]	$f4$ [Гц]	$f5$ [Гц]	$f6$ [Гц]	$f7$ [Гц]
110	100	200	300	400	500	600

Розглянемо  $LC$  – фільтр до вихідних зажимів якого підключено навантаження з опором  $R_H$  (див. рис. 2.6).

Передавальна функція  $LC$  – фільтра

$$H(p) = \frac{1}{T_\phi^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_\phi \cdot p + 1} \quad (2.24)$$

де  $T_\phi = \sqrt{L_1 \cdot C_7}$  – постійна часу фільтра;

$\xi = \frac{1}{2 \cdot R_H} \sqrt{\frac{L_1}{C_7}}$  – коефіцієнт демпфування.

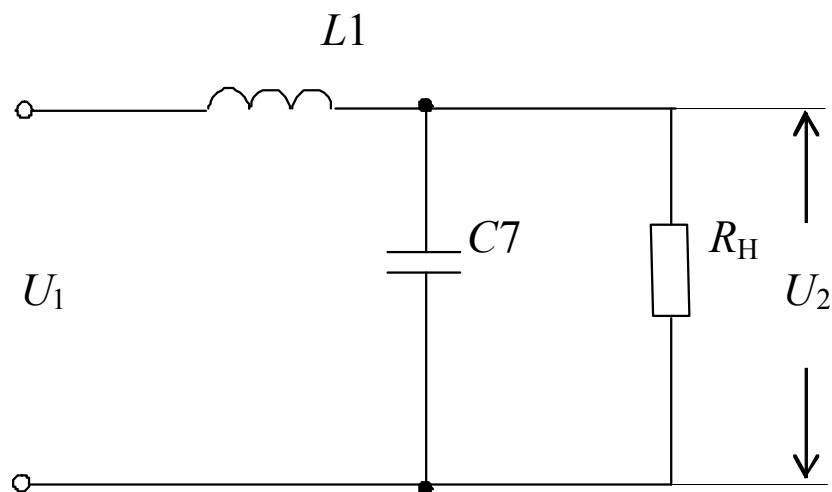


Рисунок 2.6 – Електрична схема  $LC$  – фільтра

Коефіцієнт демпфування залежить від внутрішнього опору фільтра та опору навантаження.

Амплітудно-частотна характеристика визначається виразом

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_\phi^2)^2 + 4 \cdot \xi \cdot \omega^2 \cdot T_\phi^2}}, \quad (2.25)$$

де  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  - поточне значення частоти.

Коефіцієнт фільтрації для  $q$ -ї канонічної або  $\nu$ -ї неканонічної гармоніки визначається як [3]

$$K_\phi = \frac{U_{qm}}{U'_{qm}}, \quad (2.26)$$

де  $U_{qm}$  – величина амплітуди  $q$ -ї гармоніки на вході фільтра;

$U'_{qm}$  – величина амплітуди  $q$ -ї гармоніки на виході фільтра.

Аналогічно визначається коефіцієнт фільтрації і для  $\nu$ -ї неканонічної гармоніки.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика  $LC$  – фільтра наведена на рисунку 2.7.

Власну частоту фільтра  $f_\phi$  вибирають меншою від частоти  $f_i$  компенсуємої гармоніки. В такому випадку із (2.25) з урахуванням (2.26) одержуємо

$$K_\phi \approx \frac{f_i}{f_\phi} \quad (2.27)$$

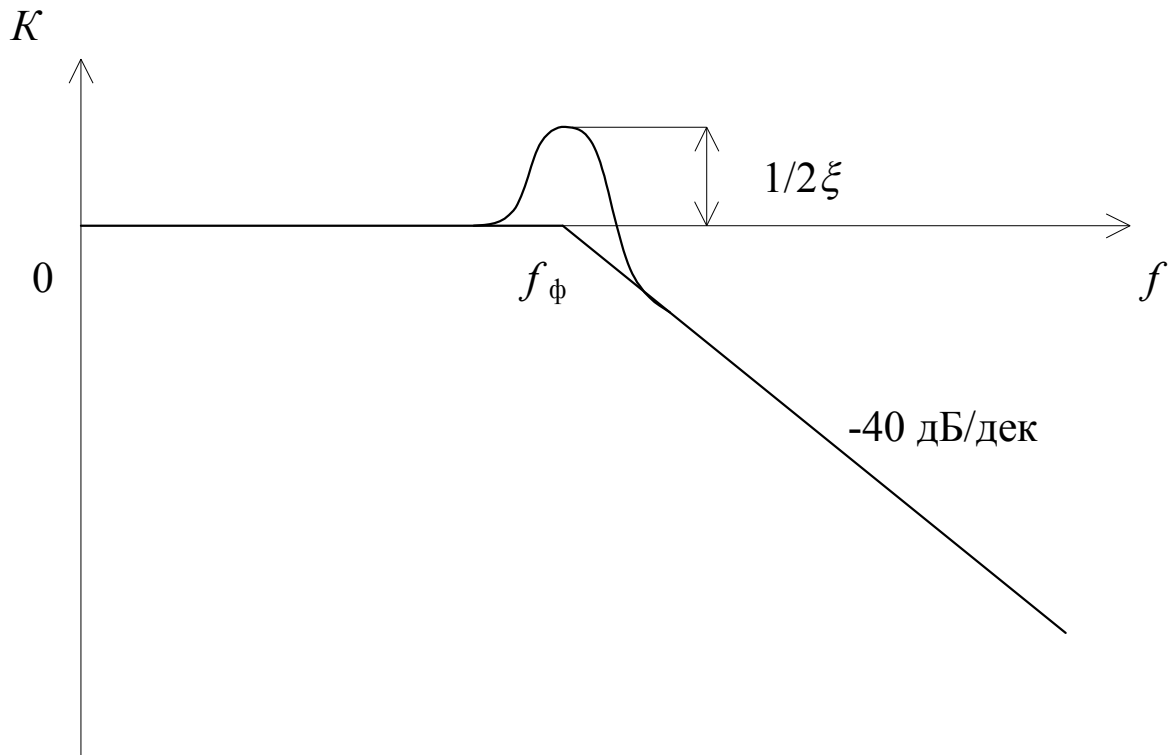


Рисунок 2.7 – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика  
 $LC$  – фільтра

Із рисунку 2.7 слідує те, що на власній частоті  $f_\phi$  фільтр не компенсує гармоніку, а навпаки збільшує її амплітуду. Для усунення цього ефекту параметри елементів фільтра вибирають такими, що  $f_\phi$  лежала за межами частотного спектру вихідної напруги випрямляча, або застосовують додаткові заходи.

Режекторний фільтр являє собою послідовний коливальний контур резонансна частота якого дорівнює частоті фільтруємої гармоніки.

На частоті резонансу коливальний контур має малий опір яким він шунтує вихідне коло  $LC$  – фільтра. Обмеження струму через контур здійснюється дроселем  $L1$ , який відіграє роль балансного опору.

Для аналізу процесу фільтрації  $q$ -ї або  $v$ -ї гармоніки розглянемо електричну схему наведену на рисунку 2.8.

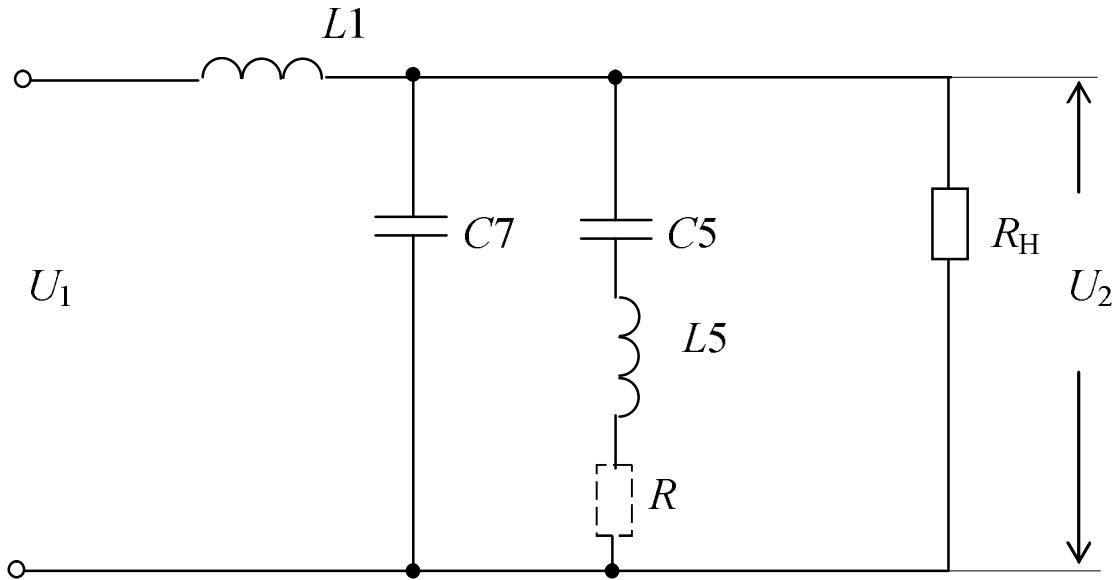


Рисунок 2.8 – Електрична схема комбінованого фільтра

Передавальна функція наведеної електричної ланки

$$G(p) = \frac{T_2^2 p^2 + 1}{T_o^2 T_2^2 p^4 + T_1 T_2^2 p^3 + (T_o^2 + T_2^2 + T_3^2) p^2 + T_1 p + 1}, \quad (2.28)$$

де  $T_1 = \frac{L_1}{R_H}, \quad T_2^2 = L_5 C_5, \quad T_3^2 = L_1 C_5, \quad T_o^2 = L_1 C_7.$

Амплітудно-частотна характеристика цієї ланки

$$K_k(\omega) = \frac{1 - \omega^2 T_2^2}{\sqrt{[\omega^4 T_o^2 T_2^2 - \omega^2 (T_o^2 + T_2^2 + T_3^2) + 1]^2 + \omega^2 T_1^2 (1 - \omega^2 T_2^2)^2}}. \quad (2.29)$$

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика комбінованого фільтра наведена на рисунок 2.9

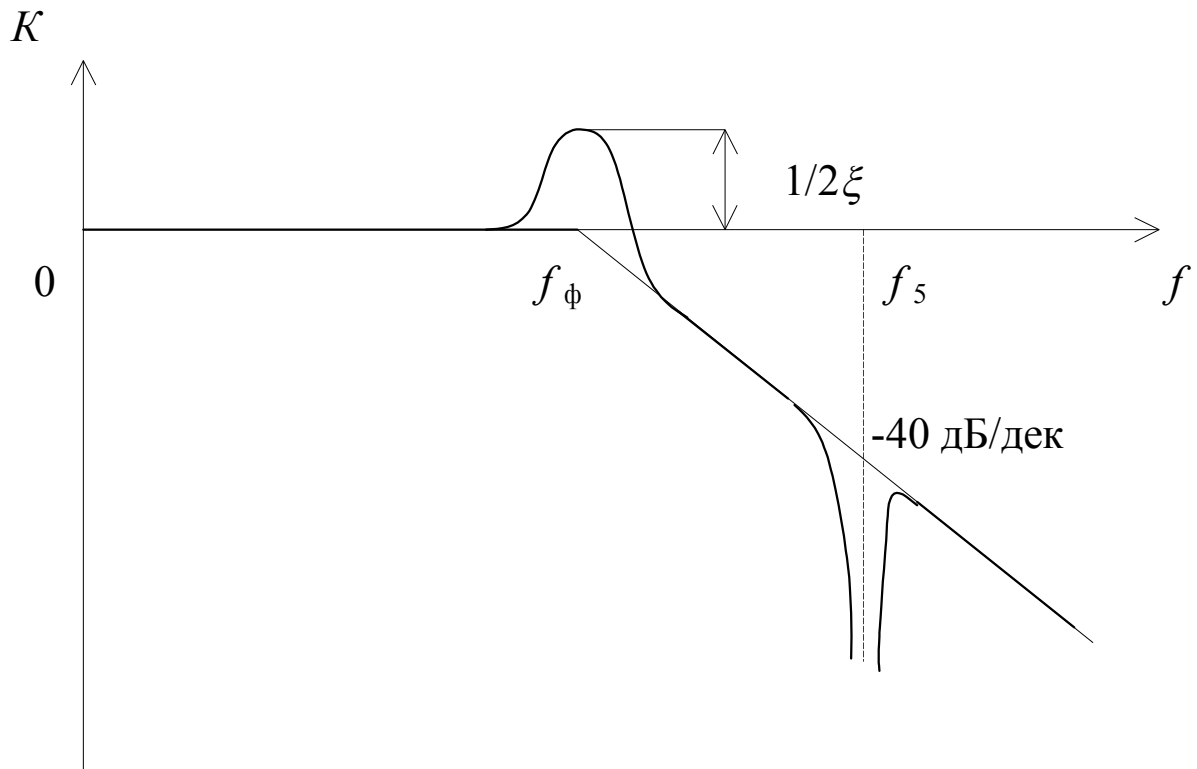


Рисунок 2.9 – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика комбінованого фільтра

Із (2.22) випливає, що коефіцієнт передачі аналізуємого фільтра на резонансній частоті режекторної ланки ( $C5$ ,  $L5$ ) дорівнює нулю. Тобто, коефіцієнт фільтрації гармоніки частота якої дорівнює резонансній частоті ежекторної ланки  $K_{\phi\kappa} \rightarrow \infty$ . В реальних умовах величина  $K_{\phi\kappa}$  має кінцеве значення із-за наявності активного опору  $R$  в режекторному фільтрі (див. рис. 2.8).

### Список рекомендованих джерел

1. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М. : УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Двенадцатипульсовые выпрямители тяговых подстанций / Под ред. М. Г. Шалимова. – М. : Транспорт, 1990. – 127 с.
3. Руденко В. С. Преобразовательная техника / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко. – Киев : Вища школа, 1978. – 424 с.
4. Щербак Я. В. Замкнутые системы компенсации неканонических гармоник полупроводниковых преобразователей / Я. В. Щербак. – Харьков : ХФИ «Транспорт Украины», 1999. – 256 с.
5. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. – М. : Энергия, 1977. – 128 с.
6. Тяговые подстанции / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин, М. Г. Шалимов. – М. : Транспорт, 1986. – 319 с.

Таблиця А.1– Варіанти завдання для розрахунково-графічної роботи

№ з/п	$U_2$ [В]	$U_1$ [кВ]	$I_d$ [А]	$\varepsilon$ %	$R_H$ [Ом]	$\varphi_{(1)}$
1	190	6	1000	1	20	0
2	200	10	1500	0,5	10	0
3	250	35	2000	2	30	0
4	256	10	2500	1,3	20	0
5	290	6	3000	0,7	10	0
6	300	35	2000	0,8	40	0
7	350	10	1000	1,2	20	0
8	400	6	1500	1,8	40	0
9	450	35	3000	1,5	30	0
10	500	10	1000	1	40	0
11	550	6	2000	0,5	20	0
12	600	10	2500	0,8	10	0
13	700	35	3000	1,1	40	0
14	800	6	1000	0,9	30	0
15	900	6	2500	1,6	20	0
16	1000	10	2000	1,4	10	0
17	1100	6	1000	1	30	0
18	1200	35	3000	1,5	20	0
19	1250	10	1500	0,5	30	0
20	1280	6	2000	0,7	40	0
21	650	10	1000	0,4	10	0
22	825	6	3000	1,7	30	0
23	3000	35	2000	0,9	20	0
24	3300	10	1000	1	40	0
25	600	6	2000	1,5	10	0



*Навчальне видання*

Методичні вказівки  
для виконання розрахунково-графічної  
роботи з навчальної дисципліни

## **«ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ»**

*(для студентів усіх форм навчання і слухачів другої вищої освіти  
за напрямом 6.050702 – Електромеханіка спеціальність  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (фахове  
спрямування «Електричні системи і комплекси транспортних засобів»,  
«Електричний транспорт», «Електромеханічні системи автоматизації  
та електропривод»))*

Укладач **ІВАКІНА** Катерина Яківна

Відповідальний за випуск *О. В. Кульбашиний*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 177М

---

Підп. до друку 22.12.2016 р.  
Друк на ризографі  
Зам. №

Формат 60×84/16  
Ум. друк. арк. 1,0  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.